

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт Машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

**Шемякинский
Борис Александрович**

**Разработка и исследование технических решений для повышения
износостойкости бурильного оборудования**

Направление подготовки: 22.06.01 Технологии материалов

Код и наименование

Направленность: 22.06.01_06 Материаловедение по отраслям

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Шемякинский Б.А.
Научный руководитель: профессор,
д.т.н., Скотникова М.А.

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ Машиностроения
Института ИММиТ федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ Машиностроения: – *Любомудров Сергей
Александрович – к.т.н.,
доцент*

Научный руководитель: – *Скотникова Маргарита
Александровна – д.т.н.,
профессор*

Рецензент: – *Мотовилина Галина
Дмитриевна – к.т.н., доцент.
НИЦ «Курчатовский институт»
- ЦНИИ КМ Прометей, ст.н.с.*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

При бурении глубоких и, особенно наклонных и горизонтальных скважин с большим удалением от вертикали, чрезвычайно важно обеспечить надёжную работу бурильного оборудования, эксплуатирующегося в условиях экстремальных нагрузок и температур. Компонировка и вес бурильного оборудования и отдельных его элементов существенным образом влияют на технико-экономические показатели проводки скважин, что накладывает известные ограничения на выбор материалов бурильных труб и коэффициента запаса прочности.

Для защиты от влияния множества разрушающих материалов оборудования факторов существуют различные способы. Один из самых распространённых – это применения износостойких наплавов на выступающие части оборудования (хардбендинг). В последнее время в связи с ростом числа скважин с трудноизвлекаемыми запасами, возникает потребность в применении нестандартных решений в добыче углеводородов. Основными факторами, усложняющими добычу, являются: глубина залегания нефти и газа и коррозионноагрессивные сероводородные и углекислотные среды. В последнее время все чаще применяются бурильные трубы из алюминиевых сплавов.

Алюминиевые сплавы обладают ценными физико-механическими свойствами, выгодно отличающими их от сталей, традиционного материала для изготовления бурильных труб. Удельный вес и модуль упругости алюминиевых сплавов почти в 3 раза ниже, чем у сталей, а удельная прочность - отношение предела прочности на разрыв к удельному весу - в 1,5-2 раза выше. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов в агрессивных средах – сероводороде, углекислом газе может быть сопоставима только со специальными сплавами с высоким содержанием хрома. Алюминиевые сплавы характеризуются стабильностью механических свойств при низких температурах, высокой технологичностью в процессе обработки давлением и резанием.

Ощутимым недостатком легкосплавных бурильных труб из алюминиевых сплавов (ЛБТ) является их высокая степень износа при контакте со стальными обсадными трубами. Конструктивные решения по утолщению стенок (внутренние концевые утолщения, протекторное утолщение) не решают эту проблему полностью.

В связи с этим обстоятельством, в условиях инновационного развития экономики Российской Федерации возникает необходимость использования наукоёмких технологий, связанных с инженерией высококачественных поверхностей и кромок, модификацией поверхностных слоёв бурильного оборудования. При этом особое внимание уделяется покрытиям поверхностных слоёв ответственных деталей бурильного оборудования.

Возникает необходимость использования наукоёмких модифицирующих и упрочняющих технологий для повышения износостойкости поверхностных

слоёв и кромок бурильных труб и оборудования. При этом особое внимание уделяется покрытиям поверхностных слоёв и алмазоподобным нанокompозитным вставкам.

Цель работы. Повышение износостойкости бурильного оборудования при контакте со стальными обсадными трубами и горными породами.

Задачи исследования:

1. Разработать установку для проведения испытаний бурильного оборудования на коррозионно-абразивный износ.
2. Разработать установку для проведения испытаний на комплексное вращение образцов бурильных труб с покрытиями в стволе скважины.
3. Исследование триботехнических свойств исследованных бурильных труб с покрытиями.
4. Исследование покрытий образцов бурильных труб с помощью оптической микроскопии и микротвердости.
5. Исследование триботехнических свойств поверхностных слоёв с покрытиями из алмазоподобных нанокompозитных вставок.
6. Рентгеноструктурный анализ покрытий бурильных труб.
7. Микрорентгеноспектральный анализ покрытий бурильных труб.
8. Механические испытания бурильных труб с покрытиями.

Научная новизна

1. Получен патент на коррозионно-абразивный износ бурильного оборудования.
2. Спроектирован и реализован испытательный стенд для проведения испытаний на износ с имитацией бурения скважины приближенной к реальным условиям.
3. Разработана и верифицирована методика ускоренных испытаний трубных сталей нефтяного сортамента на коррозионное растрескивание.

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработанные методики позволят сравнительно оценивать материалы, используемые при бурении нефтяных и газовых скважин в условиях приближенных к реальным.
2. По результатам проведенных испытаний будут даны практические рекомендации по нанесению противоизносных покрытий на легкосплавные алюминиевые бурильные трубы.
3. Полученные результаты необходимы для подготовки учебного пособия и курса лекций в магистратуре 15.04.01_14 по дисциплине «Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении».

Апробация работы

Результаты работы докладывались на:

1. Конференции “Tribology and design” Kos, Greece **2012**.
2. Конференции «Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении» Санкт-Петербург, **2014**.
3. International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, NAOE2016, June 6-8, 2016, Saint-Petersburg, Russia, **2016**.

4. Tsinghua University Global Strategic Academic Partnership Summit. Shenzhen, China, on Oct. 18-19, **2018**.
5. Международной конференции «New Materials and Technologies in Mechanical Engineering», ИММиТ, 12 - 15 марта **2019**.
6. Международной конференции «Material Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry» (MS-SAMC-2019), ИММиТ, 20-21 ноября **2019**.

Публикации

Основные результаты исследований были опубликованы в **9** рецензируемых статьях, в том числе: в **6**-ти изданных в журналах, индексируемых в **ВАК** и **Scopus**, в **2**-х монографиях и в **1** Патенте.

Стажировка

Работа выполнялась, в том числе, в Лаборатории Университета Циньхуа, Пекин, Китай, рамках выделенного Гранта со стороны КНР аспиранту 3 курса СПбПУ Б.А. Шемякинскому с июля 2018 по октябрь 2018.

Представление научного доклада: основные положения

1. Разработка методик определения триботехнических параметров при бурении нефтяных и газовых скважин
2. Оценка влияния воздействия коррозионных и эрозионных параметров на бурильное оборудование
3. Результаты стажировки в университете Циньхуа, Пекин, Китай

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Объектом исследования являются образцы бурильных труб с нанесенными на них противоизносными покрытиями, которые должны соответствовать уровню высокопрочных конструкционных материалов.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Методика и материалы

Для проведения натуральных испытаний бурильных труб были спроектированы, разработаны, подтверждены патентами ряд многофункциональных стендов, в частности:

- стенд для проведения испытаний на комплексное вращение образцов бурильных труб с покрытиями в стволе скважины.
- стенд для испытания бурильного оборудования на коррозионно-абразивный износ (Патент № 2697030 от 08.08.2019).

Проведены исследования триботехнических свойств исследованных бурильных труб с покрытиями.

Проведены исследования покрытий образцов бурильных труб с помощью оптической микроскопии и микротвердости.

Проведены исследования триботехнических свойств поверхностных слоёв с покрытиями из алмазоподобных нанокompозитных вставок.

2.1.1. Разработка стенда для проведения испытаний на комплексное вращение образцов бурильных труб с покрытиями в стволе скважины

Одной из важных проблем в механике бурения, остающейся до настоящего времени в числе дискуссионных, является создание адекватной модели силы трения бурильной колонны (БК), вращающейся в скважине, и одновременно движущейся вдоль ее оси. Подобное сложное движение БК характерно для роторного бурения, а также для спускоподъемных операций с вращением.

Из практики и теории бурения известно, что при вращении БК вокруг собственной оси точка БК, контактирующая со стенкой скважины, как правило, не стоит на месте, а постоянно совершает колебательное движение, относительно оси скважины (рис. 1). Амплитуда этих колебаний может быть небольшой при относительно малых оборотах вращения БК. Однако при «достаточно» высоких оборотах может начаться перекатывание БК по всей окружности скважины (whirling). Такое движение напоминает вращение малой шестерни внутри большой при внутреннем зацеплении.

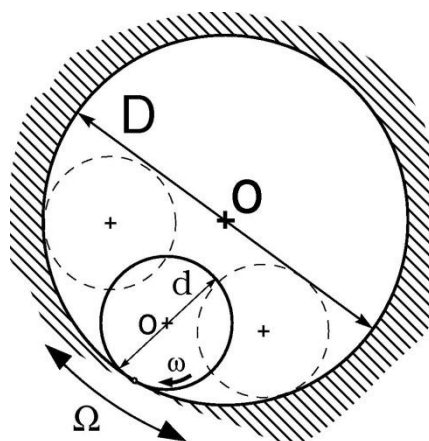


Рисунок 1. Сложное вращение БК в скважине

Условие идеального перекатывания, без проскальзывания, как и для шестереночного зацепления, имеет вид:

$$v_r = 0.5(\omega d - \Omega D) = 0 \quad (1)$$

где v_r – окружная скорость точки контакта; D – диаметр скважины; d – диаметр БК; ω – угловая скорость БК относительно центра масс; Ω – угловая скорость перекатывания (вращения оси БК относительно оси скважины).

В реальных условиях движение БК может происходить с проскальзыванием, и в этом случае точное равенство может нарушаться.

В процессе идеального перекатывания на БК в окружном направлении будет действовать сила трения качения, которая почти на порядок меньше силы трения скольжения. Можно также предположить, что при «слабом» нарушении равенства (1) природа силы трения не изменится: определяющей останется сила трения качения. При увеличении разницы между компонентами скорости $0.5\omega d$ и $0.5\Omega D$ будет преобладать трение скольжения.

Все вышесказанное физически достаточно очевидно, однако при разработке практически всех статических и динамических моделей БК сила трения катания из рассмотрения исключается, без какого бы ни было обоснования. А ведь такое упрощение модели трения может привести к существенной переоценке момента трения БК при роторном бурении.

Другой очень важный аспект этой проблемы связан с влиянием сложного вращения БК на силу трения в продольном направлении в процессе бурения и спускоподъемных операций с вращением (рис. 2).

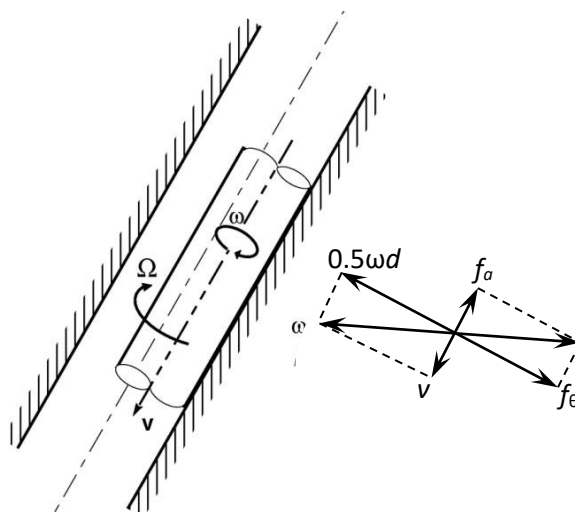


Рисунок 2. Схема сил трения, действующих на вращающуюся БК при бурении

При стандартном подходе к определению силы трения при продольном перемещении БК с вращением, когда перекачивание БК по стенке скважины не рассматривается, модель трения формулируется следующим образом [4]. Суммарный вектор скорости БК складывается из вектора окружной скорости, равной по модулю $0.5\omega d$, и вектора продольной скорости v . При этом сила трения действует в направлении, противоположном вектору суммарной скорости. Окружная f_θ и осевая f_a компоненты этой силы пропорциональны проекциям вектора суммарной скорости на соответствующие направления:

$$f_\theta \sim 0.5\omega d / [(0.5\omega d)^2 + v^2]^{1/2}; \quad (2)$$

$$f_a \sim v / [(0.5\omega d)^2 + v^2]^{1/2}. \quad (3)$$

При $0.5\omega d \gg v$, что выполняется практически всегда, $f_\theta \sim 1$, $f_a \sim v/0.5\omega d$. Отсюда следует, что продольную компоненту силы трения можно существенно снизить за счет увеличения угловой скорости БК ω .

Однако возникает вопрос, какую величину окружной скорости при сложном вращении БК с перекачиванием брать в расчет при определении продольной компоненты силы трения f_a (2)? На первый взгляд, кажется, что в этом случае окружную скорость БК $v_\theta = 0.5\omega d$ следует заменить на скорость точки контакта $v_r = 0.5(\omega d - \Omega D)$ (1). Однако при идеальном перекачивании

относительная скорость v_r может упасть до нуля. Тогда, как следует из второго уравнения (2), $f_a \sim 1$, и эффект снижения продольной силы трения за счет вращения БК пропадает.

На данном этапе решались две основные задачи, для понимания эффекта вращения на величину силы и момента трения:

- При каком соотношении скорости вращения БК относительно центра масс и скорости перекачивания окружную компоненту силы трения можно считать силой трения скольжения, а при каком силой трения качения?
- Как перекачивание БК по стенке скважины влияет на продольную компоненту силы трения скольжения?

Механическое трение – довольно сложный процесс, зависящий от большого количества факторов: шероховатости поверхности контактирующих тел, характеристик материалов, из которых они изготовлены, скорости скольжения, прижимающей силы, контактного давления, температуры и др. При наличии относительного движения двух контактирующих тел силы трения, возникающие при их взаимодействии, подразделяются на:

- Трение скольжения;
- Трение качения
- Трение покоя.

Основные законы трения, которым подчиняется трение скольжения, были развиты Кулоном. В соответствии с законом Кулона сила трения прямо пропорциональна силе, прижимающей поверхности тел и не зависит ни от скорости движения, ни от величины контактного давления. Кулон также установил, что трение качения прямо пропорционально прижимающей силе и обратно пропорционально радиусу катка. Трение покоя, возникающее между двумя контактирующими телами и препятствующее возникновению относительного движения, также принято считать пропорциональным прижимающей силе.

Но судя по проведенным испытаниям и по исследованной литературе для пары трения сталь- сталь существуют различные значения коэффициента трения скольжения.

Обращают на себя внимание следующие особенности:

- Разброс коэффициента трения по величине – от 0.12-0.14 [7, 5] до 1.00
- Существенная зависимость коэффициента трения от контактного давления, вплоть до повреждения поверхностей.

Зависимость коэффициента трения от давления сказывается только при значительных давлениях. Так, коэффициент трения железа по железу при давлениях, не превышающих 18 кГ/см², равен 0.34; при давлении 36 кГ/см² он становится равным 0.41. При давлениях порядка 50 кГ/см² трущиеся металлические поверхности (железо, чугун, латунь) существенно повреждаются. При дальнейшем увеличении давления коэффициент трения снова уменьшается.

Отметим, что для бурильной колонны в горизонтальной скважине контактное давление в 36-50 кГ/см² является существенно заниженным. Для

оценки максимального контактного давления воспользуемся решением задачи Герца для цилиндра и цилиндрической впадины с параллельными осями:

$$\sigma_{\max} = 0.591 \sqrt{\frac{PE}{l} \frac{D-d}{Dd}}, \quad (4)$$

где P – прижимающая сила; E – модуль Юнга; l – длина площадки контакта.

Для стальных труб: бурильной, диаметром 178 мм, и обсадной, диаметром 216 мм, при длине образца 700 мм (замок бурильной колонны) и небольшой прижимающей силе в 500 Н максимальное контактное напряжение составляет 7.2 МПа или 70 кг/см². При таком значении контактного напряжения разрушение поверхностей, трущихся всухую, вполне реально.

Номенклатура испытаний включала четыре вида тестов:

- 1) Определение коэффициента трения скольжения и коэффициента трения покоя в окружном направлении (рис. 3);
- 2) Определение коэффициента трения скольжения и коэффициента трения покоя при осевом перемещении образца (рис. 4);
- 3) Определение зависимости коэффициента трения в окружном направлении при сложном вращении в диапазоне малых значений относительной окружной скорости точки контакта v_r (рис. 5);
- 4) Определение компонент окружного и осевого трения при сложном вращении и осевом перемещении образца в диапазоне малых значений относительной окружной скорости точки контакта v_r (рис. 6).

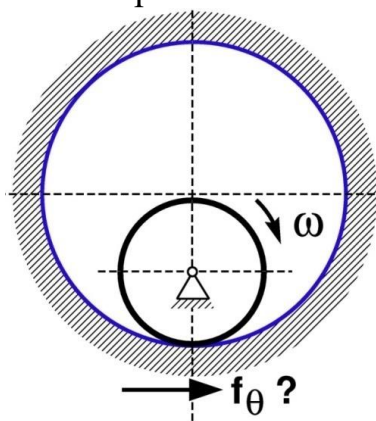


Рисунок 3. Схема испытания по определению коэффициента трения в окружном направлении

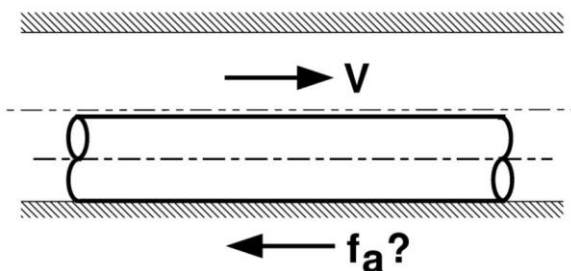


Рисунок 4. Схема испытания по определению коэффициента трения при перемещении образца в осевом направлении

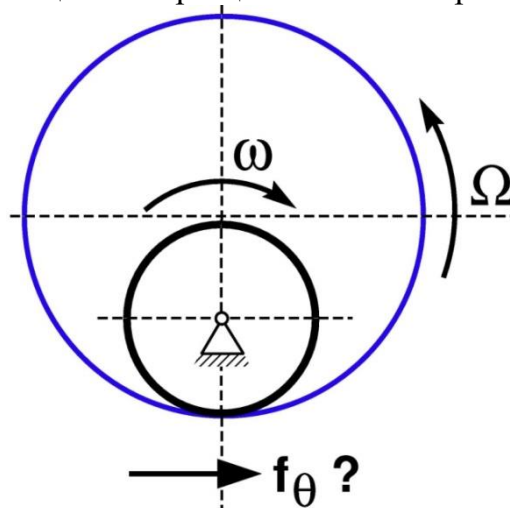


Рисунок 5. Схема испытания по определению коэффициента трения при сложном вращении

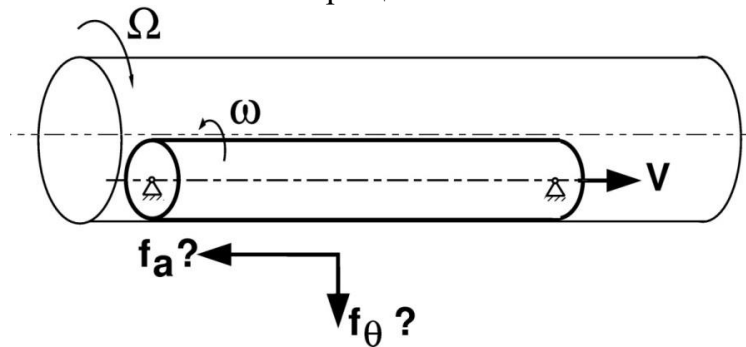


Рисунок 6. Схема испытания по определению компонент коэффициента трения при сложном вращении и окружном перемещении образца

В качестве установки для проведения вышеописанных испытаний использовался стенд, предназначенный для проведения испытаний образцов бурильных труб на износ (рис. 7, 8).



Рисунок 7. Общий вид станда

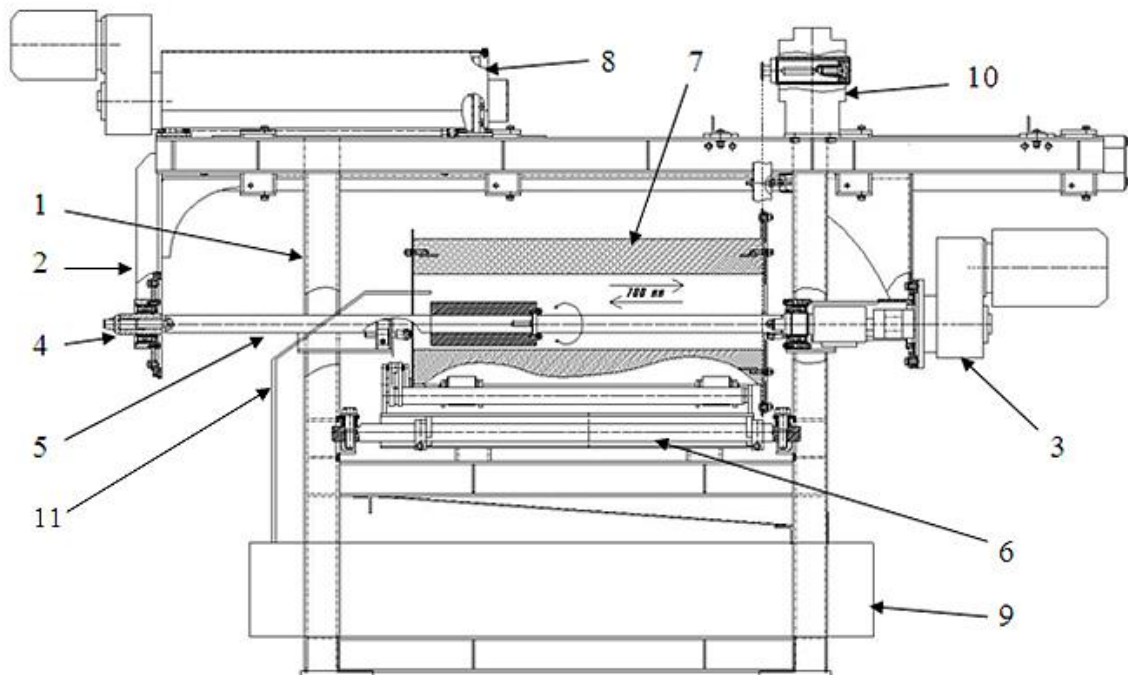


Рисунок 8. Схема станда

Станд состоит из неподвижной рамы 1, на которой закреплены:

- подвижная каретка 2 с установленными на ней приводом вращения образца 3, валом 5 с закрепленным на нем образцом и опорой вала с датчиком осевой силы 4;
- качающийся подрамник 6 с обсадной трубой 7 и датчиком силы прижатия (на рисунке не показан);
- привод осевого перемещения образца 8;
- контейнер с водой или буровым раствором 9 и трубопроводом 11, через который вода поступает во внутрь обсадной трубы;
- привод вращения обсадной трубы 10.

Стенд позволяет:

- проводить испытание на трение и износ образцов бурильных труб диаметром 90–203 мм длиной до 300 мм и образцов обсадных труб диаметром 150–300 мм длиной до 1000 мм;
- имитировать открытый ствол скважины за счет использования в качестве обсадной трубы бетонных труб различной абразивности;
- проводить испытание в среде буровых растворов практически любого типа, в том числе в растворах, содержащих твердые фракции размером до 3 мм;
- обеспечивать вращение образца бурильной трубы в обе стороны с частотой до 150 об/мин;
- обеспечивать вращение обсадной трубы с частотой до 20 об/мин;
- обеспечивать прижатие образца к обсадной трубе с контактной силой до 300 кГ;
- обеспечивать возвратно-поступательное продольное перемещение образца со скоростью до 5 м/час и ходом до 700 мм;
- обеспечить как отдельное движение элементов системы: вращение образца, обсадной трубы и продольное перемещение, так и совместное движение при любом их сочетании.

В процессе испытания обеспечивается непрерывное измерение числа оборотов и продольной скорости образца, силы прижатия, осевой силы и момента трения.

По результатам проведенных тестов были сделаны следующие заключения:

- При относительной окружной скорости точки контакта $|\bar{v}_r| \geq 0.02-0.03$ коэффициент трения в окружном направлении практически постоянен и определяется так, как если бы перекачивание образца по стенке скважины отсутствовало. При $|\bar{v}_r| < 0.02-0.03$ коэффициент трения k_θ резко падает, достигая практически нуля при $\bar{v}_r = 0$;

- При относительной окружной скорости точки контакта $|\bar{v}_r| \geq 0.02-0.03$ коэффициент трения в осевом направлении близок к нулю. При $|\bar{v}_r| < 0.02-0.03$ коэффициент трения k_a резко возрастает, достигая значения, соответствующего перемещению образца в осевом направлении без вращения. Таким образом эффект снижения силы трения в осевом направлении за счет вращения БК при малых значениях относительной окружной скорости точки контакта пропадает.

- Данные полученные в результате физического моделирования могут быть использованы для уточнения модели поведения буровой колонны при бурении скважины

2.1.2. Разработка стенда для испытания бурильного оборудования на коррозионно-абразивный износ.

В сложных производственных условиях, при транспортировке коррозионно-активной водонефтяной смеси, содержащей твердые минеральные частицы, бурильное оборудование подвергается

коррозионному воздействию одновременно с интенсивным абразивным износом. Это приводит к его преждевременному выходу из строя, связанному с образованием локальных повреждений, и обуславливает необходимость разработки метода испытаний на коррозионно-абразивный износ с учетом, как факторов абразивного износа, так и факторов коррозионного процесса. Указанный метод обеспечивает обоснованный выбор предпочтительного материала для изготовления оборудования, учитывающего эксплуатационные особенности конкретных нефтепромыслов. Для проведения испытаний была спроектирована и реализована испытательная установка для она представляет собой емкость с испытательной коррозионноактивной средой и абразивом, насоса, который направляет испытательную среду на образец, закрепленный перед соплом. В процессе испытаний есть возможность варьировать: скоростью потока, углом атаки струи и температурой среды. Схема испытательной установки представлена на рисунке 8.

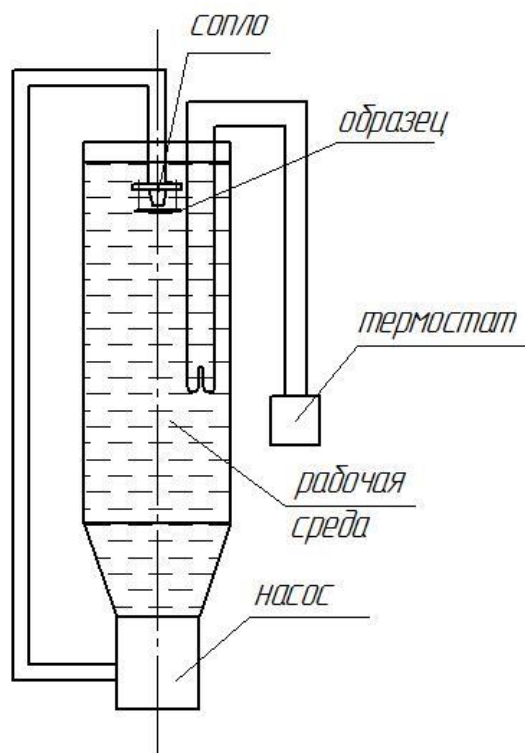


Рис. 8. Схема коррозионно-эрозионной установки

На данную методику проведения испытаний получен патент на изобретение №2697030 (рис. 9)



Рис.9 Патент на изобретение.

2.1.3. Материалы исследования

Для оценки износостойкости материалов применяемых при бурении были проведены испытания нескольких покрытий на легкосплавные алюминиевые трубы а также твердосплавные наплавки на замки алюминиевых бурильных труб, а также в рамках стажировки в университете Циньхуа были проведены сравнительные испытания алмазосодержащих вставок подшипников главного вала роторных управляемых систем. В таблице 1 приведены химические составы износостойких покрытий на основе железа которые наносились на алюминиевые бурильные трубы.

Таблица 1

Химический состав материала покрытий на алюминиевых бурильных трубах

Покрытие	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	Ti	S	P	B
ОП	осн	0,22	0,35	0,15	14,2	0,16	0,32	0,07	0,04	<0,035	<0,035	0,008
П 20X13	осн	0,23	0,39	0,78	13,5	0,24	0,20	0,07	0,07	<0,035	<0,035	0,006
20X13	осн	0,16-0,25	≤0,8	≤0,8	12-14	≤0,8	-	-	-	≤0,025	≤0,030	-
П 40X13	осн	0,40	0,32	0,46	14,6	0,23	0,18	0,01	0,03	<0,035	<0,035	0,011

40X13	осн	0,35-0,44	≤0,6	≤0,6	12-14	≤0,6	-	-	-	≤0,025	≤0,030	-
WS	осн	0,36	0,68	2,0	5,0	2,0	0,05	0,7	1,6	<0,035	<0,035	2,6

Химический состав покрытий «П» (первая и вторая партии) практически соответствуют ГОСТ 5632-72 за исключением повышенного содержания серы и фосфора. В качестве исходных материалов для нанесения покрытий из сталей 20X13 и 40X13 использовались соответствующие порошки, этим можно объяснить повышенное содержание данных элементов. Способ нанесения покрытия – HVOF. Химический состав покрытия «ОП» близок по составу с покрытием 20X13. Состав покрытия «WS» отличается низким по сравнению с остальными материалами содержанием хрома (5%) и высоким содержанием никеля (2%), титана (1,6%) и бора (2,6%). Способ нанесения покрытий – ЭДП.

При нанесении покрытий в трех компаниях применялись различное оборудование и возможны различия технологических параметров процессов (расстояние между рабочим агрегатом и подложкой, расход газов, время нанесения покрытия и т.д.), что вероятно могло в различной степени сказаться на разогреве материала подложки. Используемый алюминиевый сплав бурильной трубы (подложки) применяется в искусственно состаренном состоянии, а следовательно, в результате разогрева может происходить изменение микроструктуры и свойства металла трубы. Поэтому была выполнена оценка влияния технологических разогревов процессов напыления на эволюцию структуры и свойств материала трубы (алюминиевый сплав 1953).

2.2. Исследования покрытий образцов бурильных труб с помощью оптической микроскопии и микротвердости

Исследования выполнялись на оптическом металлографическом микроскопе MeF3M Reichert-Jung. Микроструктура изучалась при увеличении $\times 200$, на трех уровнях: у внешней поверхности трубы, в середине и у внутренней поверхности трубы.


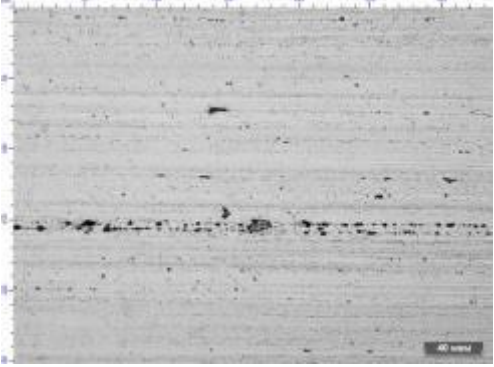
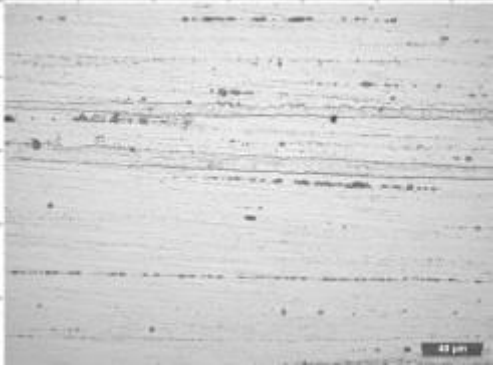
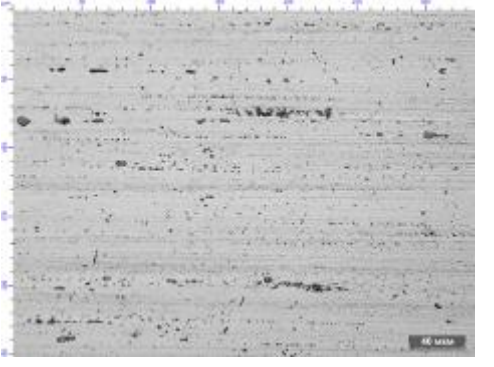

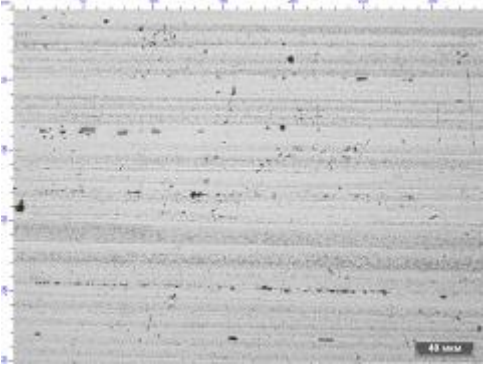
Заготовки металлографических образцов для изучения микроструктуры проходили шлифовку на абразивных кругах, полировались с помощью алмазных паст и суспензии окиси кремния с последующим травлением в растворе 3% плавиковой кислоты.

Фотографии микроструктуры шлифов, вырезанных из трубы после нанесения покрытия «ОП» представлены в таблице.

По аналогичной методике были исследованы структуры сплава 1953 после нанесения покрытий «П» 20X13, 40X13, «WS» аномальных изменения микроструктуры не обнаружено.

Для оценки влияния технологических разогревов на твердость металла проводилось измерение микротвердости металла по толщине стенки трубы. Распределение твердости по толщине стенки трубы определялась на четырех образцах, вырезанных из секций труб с исследуемыми покрытиями. Результаты замеров показаны на рис.10.

Значимых различий структуры сплава 1953 после нанесения покрытия («ОП») в сравнении с состоянием поставки не обнаружено.

Расположение объекта	Структура сплава 1953Т1 в состоянии поставки,×200	Структура сплава 1953Т1 после нанесения покрытия,×200
у внешней поверхности трубы		
в середине толщины стенки трубы		
у внутренней поверхности трубы		

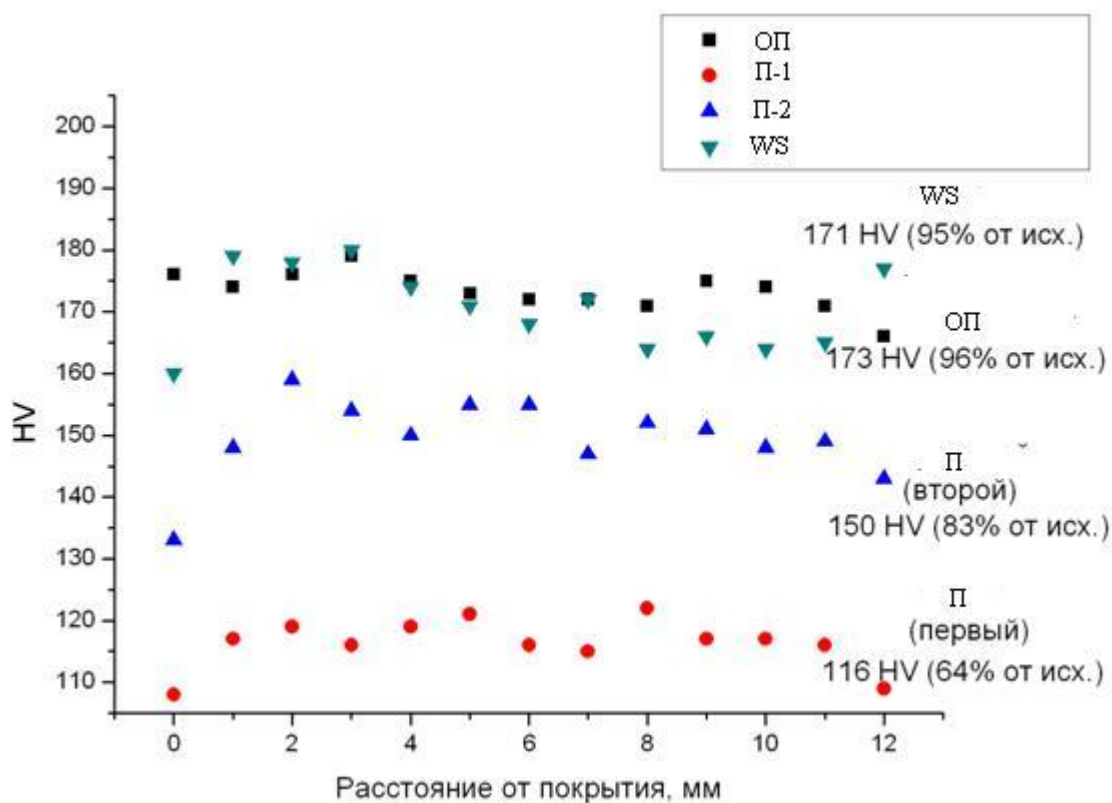


Рис.10 Распределение твердости по сечению стенки трубы из сплава 1953

В результате проведенных измерений можно сказать, что наибольшее разупрочнение металла трубы наблюдается на образце с покрытием «П» (первый), наименьшее разупрочнение металл подложки обнаружено на образцах с покрытием «WS» и «ОП».

Далее была проведена оценка микроструктуры покрытий.

Микроструктура покрытия ОП состоит из большого числа структурных составляющих каплевидной (см. рис. 120 440 HV), неправильной (см. рис. 11 630 HV) или чешуйчатой (см. рис. 120 390 HV) форм различных размеров с межфазными границами с многочисленными окисными пленами, что является типичной картиной для электродугового метода нанесения покрытий.

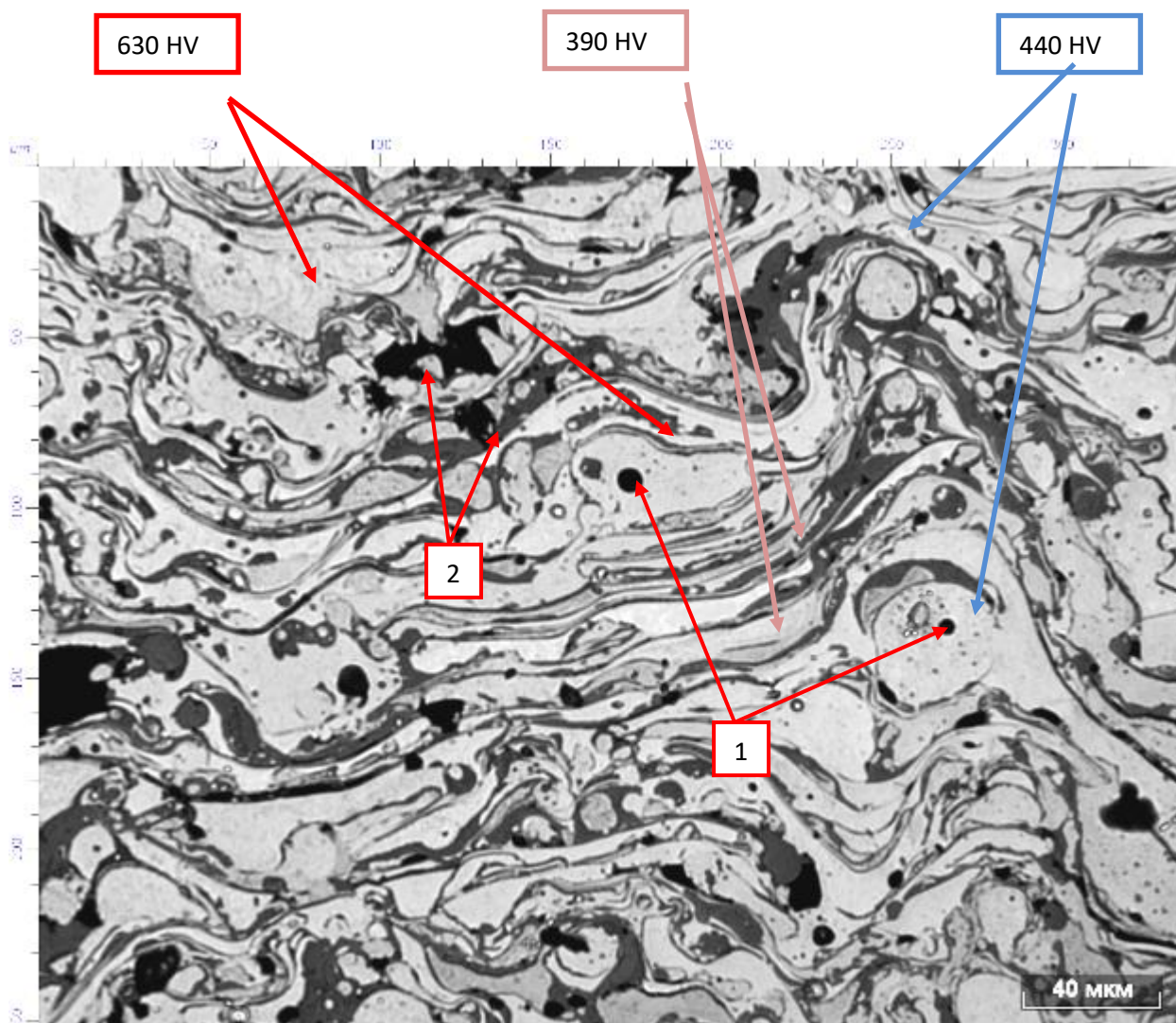


Рис. 11 Фотография микроструктуры покрытия «ОП», х200

При изучении микроструктуры данного покрытия обнаружена незначительная пористость:

1. Внутри отдельных фаз поры шаровидной формы (диаметром от 2 до 30 мкм), возникшие на этапе нахождения материала покрытия в жидком или полужидком состояниях;
2. На межфазных границах поры неправильной формы (размером от 5 до 50 мкм) повторяющие контуры отдельных структурных составляющих.

Средняя пористость – 4,5 %.

Микроструктура покрытия «П-1» в основном состоит фаз чешуйчатой (см рис. 12 420 HV) и неправильной (см рис. 121 430 HV) форм различных размеров с большим количеством межфазных границ с многочисленными окисными пленками, возникшие в процессе нанесения покрытия.

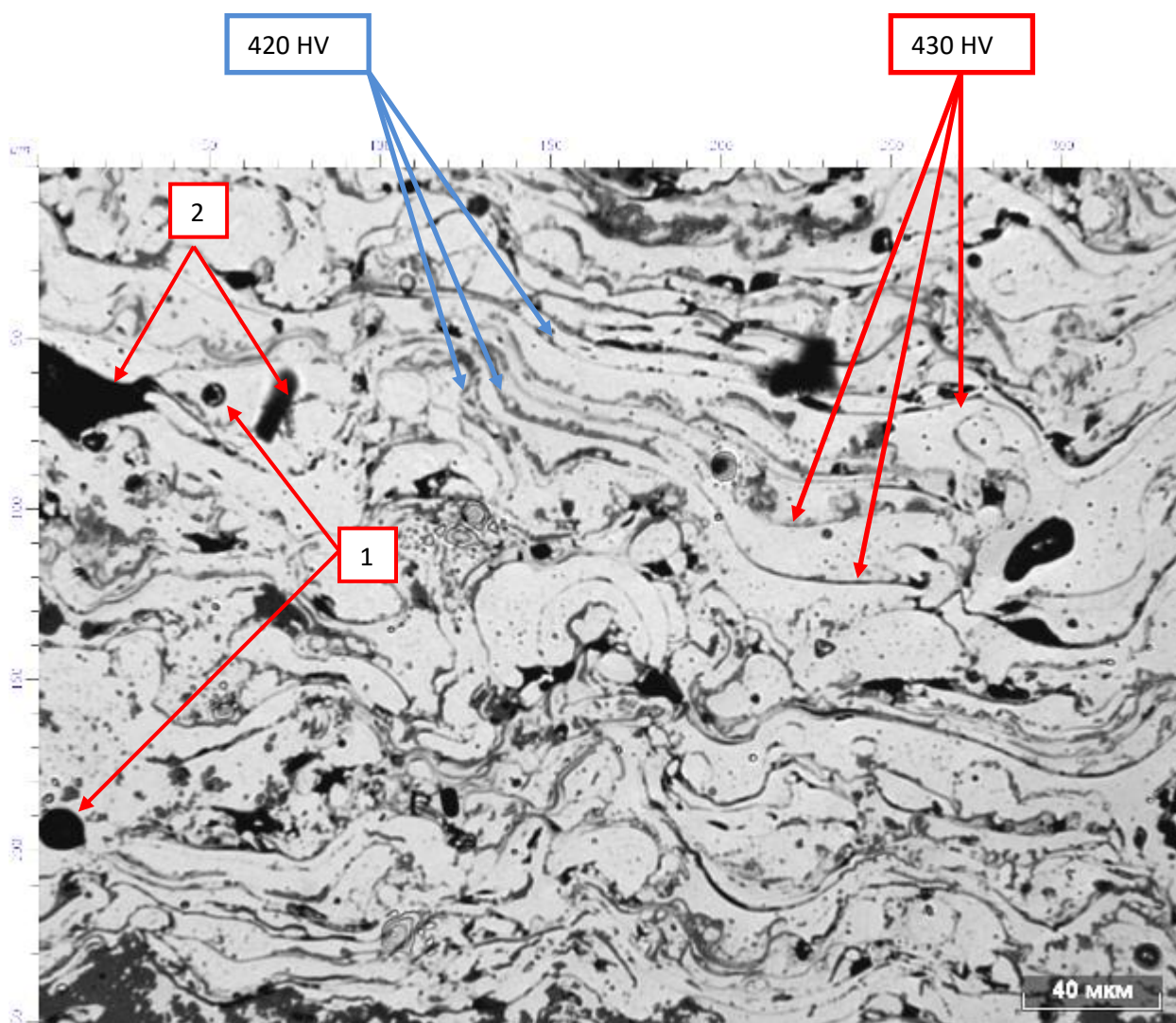


Рис. 12 Фотография микроструктуры покрытия «П» 20X13, x200

При изучении микроструктуры данного покрытия обнаружены незначительные поры:

1. Внутри отдельных фаз поры шаровидной формы (диаметром от 2 до 20 мкм), возникшие на этапе нахождения материала покрытия в жидком или полужидком состояниях;

2. На межфазных границах поры неправильной формы (размером от 10 до 70 мкм) повторяющие контуры отдельных структурных составляющих.

Средняя пористость – 6,4 %.

Микроструктура покрытия «П-2» в основном состоит из фаз неправильной (см рис.12 558 HV) и чешуйчатой 9 (см рис.13 662 HV) форм различных размеров с большим количеством межфазных границ с многочисленными окисными пленками, возникшие в процессе нанесения покрытия.

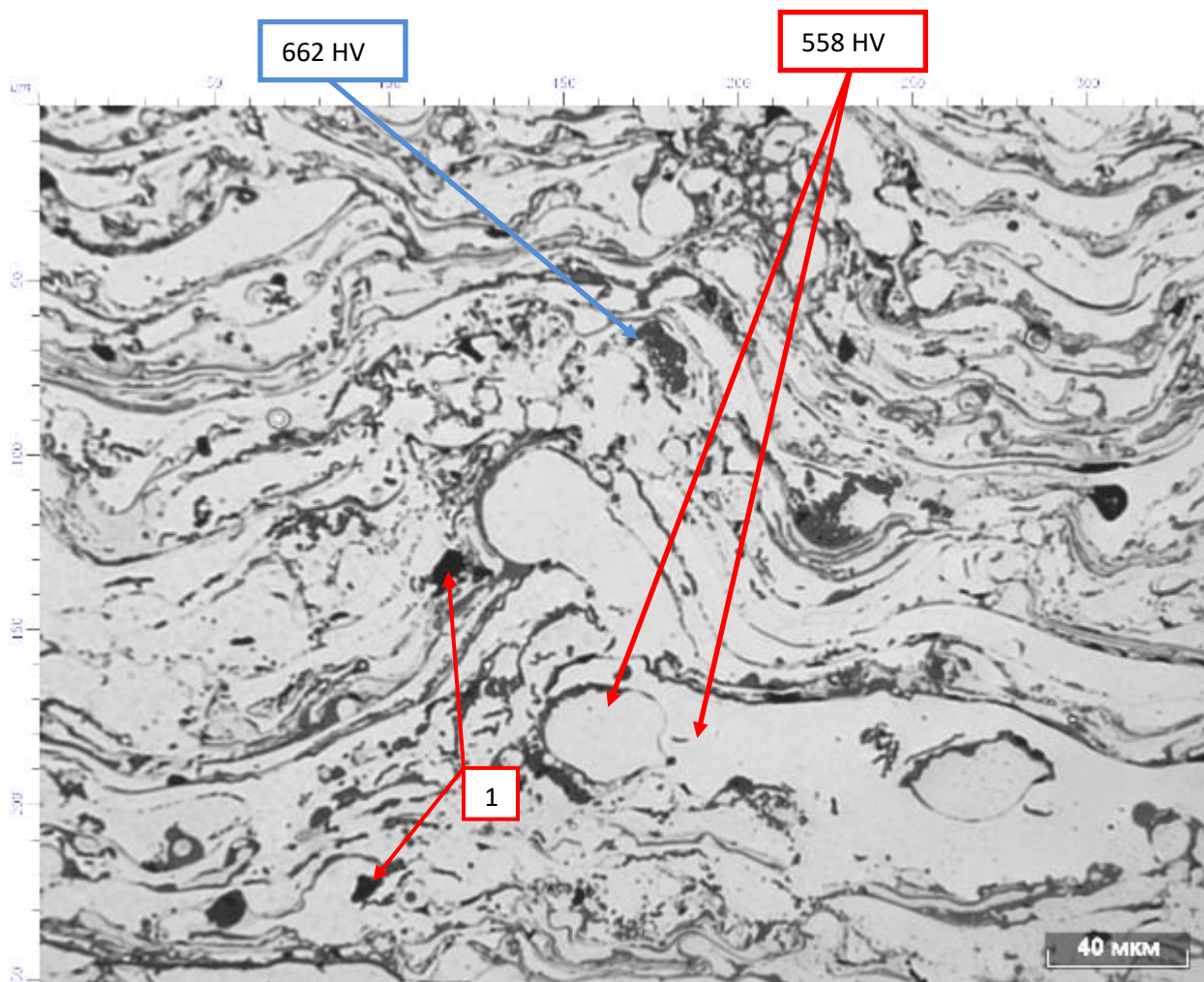


Рис.13 Фотография микроструктуры покрытия «П» 40X13, x200

При изучении микроструктуры данного покрытия обнаружены на межфазных границах поры (см рис.12 №1) неправильной формы (размером от 5 до 10 мкм) повторяющие контуры отдельных структурных составляющих. Средняя пористость – 2,0 %.

Микроструктура покрытия WS в основном состоит из фаз неправильной формы, так же по всему покрытию имеются трещины транскристаллитного характера. (рис.14).

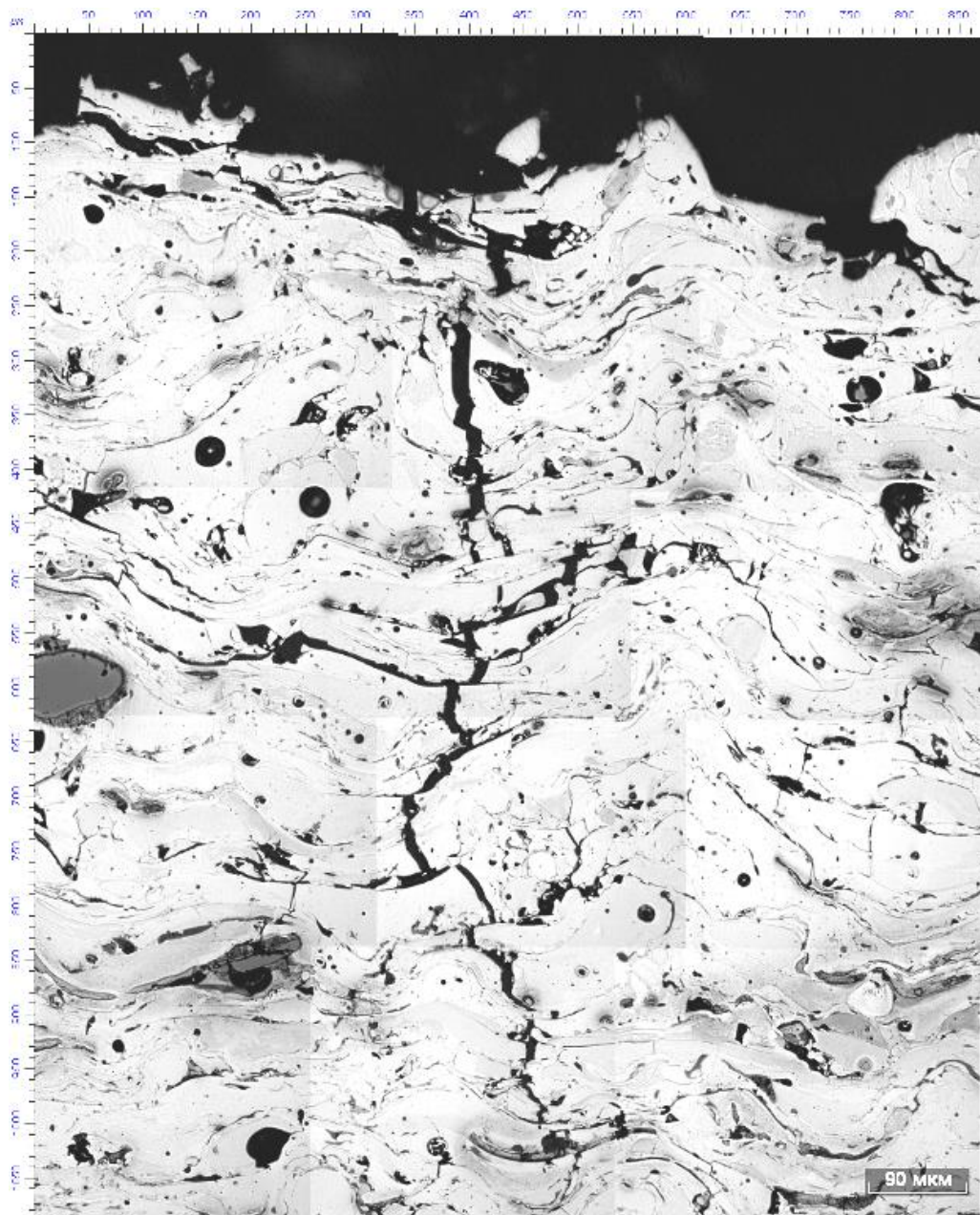


Рис. 43 Фотография трещины в покрытии «WS» (3.1).

Фотография микроструктуры покрытия показана на рис. 15.

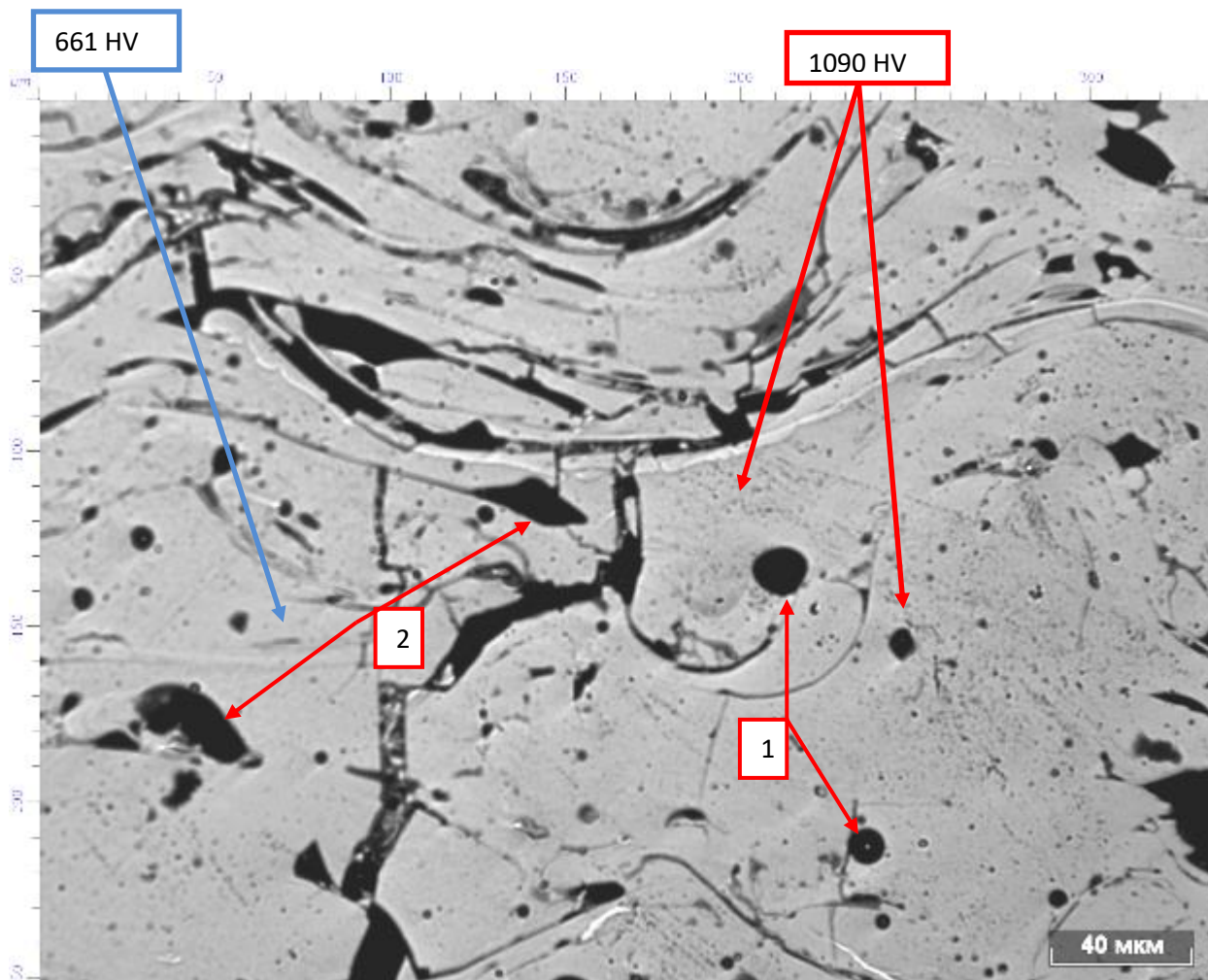


Рис.15 Фотография микроструктуры покрытия «WS» (3.1), x200

При изучении микроструктуры данного покрытия обнаружены незначительные поры:

1. Внутри отдельных фаз поры шаровидной формы (диаметром от 2 до 15 мкм), возникшие на этапе нахождения материала покрытия в жидком или полужидком состояниях;
2. На межфазных границах поры неправильной формы (размером от 10 до 40 мкм) повторяющие контуры отдельных структурных составляющих.

Средняя пористость – 4,6 %.

По проделанным металлографическим исследованиям были сделаны следующие **выводы**:

Значимых структурных превращений в металле подложки (сплав 1953Т1) в результате нанесения покрытий **не обнаружено**.

Наибольшее разупрочнение металла подложки (по замерам распределения значений микротвердости) наблюдается на образце с покрытием «П» - до 36% по толщине стенки образца, меньше всего металл подложки подвергся нагреву на образцах с покрытием «WS» и «ОП» - 5% и 6% соответственно.

Покрытие «ОП» (1.2.1) состоит из различного вида фаз которые различаются формой и значениями микротвердости 390, 440 и 630 HV. Пористость – 4.5%.

Покрытие «П»20X13 (2.2) имеет более равномерную структуру, что подтверждает значения микротвердости 420 и 430 HV. Пористость – 6.4%.

Покрытие «П»40X13 (2.3.5) состоит из двух видов фаз различающиеся по форме и значению микротвердости 558, 662 HV. Пористость – 2.0%.

Покрытие «WS» (3.1) состоит из фаз неправильной формы различной твердости 661 HV и 1090 HV. Имеются трещины по всей толщине покрытия. Пористость – 4.6%.

2.3. Исследование триботехнических свойств исследованных бурильных труб с покрытиями

Трибологические испытания проводились на испытательном стенде, суммарное время испытания одного образца – 8 часов. В качестве контртела была обсадная труба из стали N110. Усилие прижатия образца к контртелу – 120 кгс. Помимо образцов с покрытием испытывались также образцы свидетели из алюминиевого сплава и стальной образец. Фотографии образцов представлены на рисунках 16-20

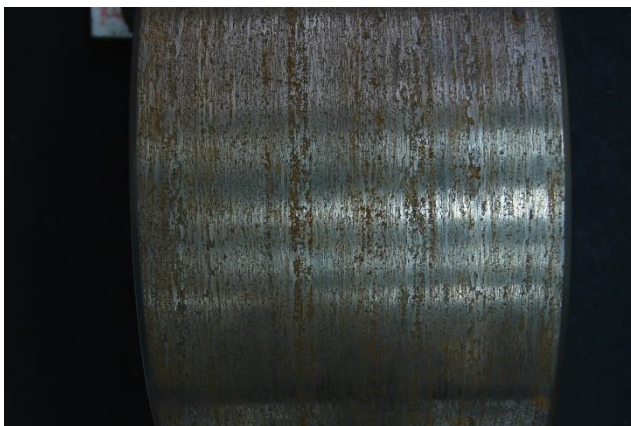


Рисунок 16. Образец ОП после испытаний

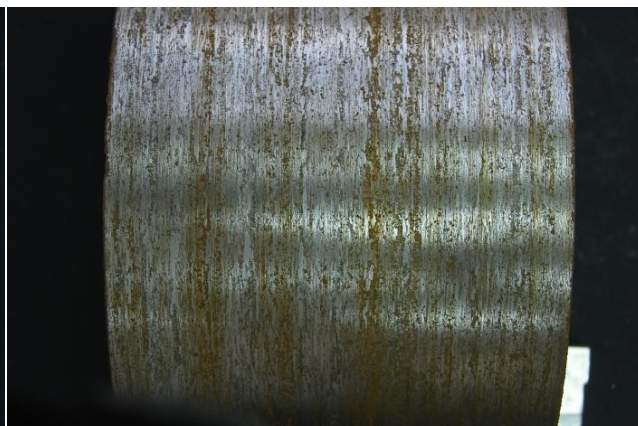


Рисунок 17. Образец П после испытаний



Рисунок 18. Образец WS после испытаний



Рисунок 19. Стальной образец после испытаний



Рисунок 20. Образец из алюминиевого сплава 1953 после испытаний
В таблице 2 представлены результаты испытаний

Таблица 2

№ пп	Производитель покрытия	№ образца	Коэффициент трения				Скорость износа, г/час			
			0-2 час	2-4 час	4-6 час	6-8 час	0-2 час	2-4 час	4-6 час	6-8 час
1	WS	3.2	0,32	0,25	0,26	0,23	53,4	87,1	78,3	65,7
2		3.3	0,26	0,25			92,9	73,1		
3		Среднее значение	0,29	0,25	0,26	0,23	73,2	80,1	78,3	65,7
4	ОП	1.2.2	0,40	0,36	0,36	0,36	21,8	29,7	29,1	28,1
5		1.2.3	0,37	0,37	0,37	0,38	4,7	16,9	22,5	21,5
6		Среднее значение	0,39	0,37	0,37	0,37	13,3	23,3	25,8	24,8
7	П	2.3.6	0,37	0,36	0,37	0,36	14,9	18,3	18,6	18,4
8		2.3.7	0,37	0,38	0,36	0,36	9,7	17,5	17,8	18,1
9		Среднее значение	0,37	0,37	0,37	0,36	12,3	17,9	18,2	18,3
10	Образцы «свидетели»	Алюминий	0,35	0,35			23,4	19,7		
11		Сталь	0,51	0,50			1,7	2,2		

По результатам испытаний можно сказать, что противоизносные защитные покрытия изнашиваются намного быстрее образцов-свидетелей из стали.

Также в рамках данной работы были проведены сравнительные трибологические испытания в ходе стажировки в университете Циньхуа. Для

проведения испытаний с целью определения триботехнических характеристик и устойчивости к износу была использована многофункциональная машина для испытания на трение и износ Plint TE-92. Испытания на испытательной установке были выполнены в государственной лаборатории трибологии университета Цинхуа в рамках договора о стратегическом партнерстве между Санкт-Петербургским Политехническим Университетом имени Петра Великого и Университетом Цинхуа (Китайская Народная Республика, Пекин) Испытательная установка позволяет проводить испытания по схеме «плоскость-плоскость» в диапазоне нагрузок от 20 до 10000Н и скоростью вращения от 30 до 3000 об/мин (рисунок 21).



Рис.21. Испытательная установка Plint TE-92

Для проведения трибологических испытаний на установке Plint TE-92 в качестве контртела использовался стальной диск с высокой твердостью. Испытания проводились по системе «плоскость-плоскость», три образца одновременно прижимались к стальному диску из стали ШХ15 с определенным усилием и вращались с заданной скоростью. Охлаждающей и смазывающей средой в данных испытаниях являлась вода.

Испытания проводились методом дискретного ступенчатого нагружения, образцы сначала вращались со скоростью 250 об/мин при нагрузке 100Н одну минуту, затем по две минуты при нагрузке 200, 300, 400Н, затем одну минуту при нагрузке 500Н, и затем 10 минут при усилии 500Н и скорости вращения 500 об/мин. Таким образом возможно оценить поведение коэффициента трения при различных нагрузках и также

определить его значение при устоявшемся режиме трения при максимальных нагрузках возможных на установке при данной сборке.

Пример диаграммы, полученной в ходе испытаний представлен на рисунке 21. Замеренные коэффициенты трения представлены в таблице выше.

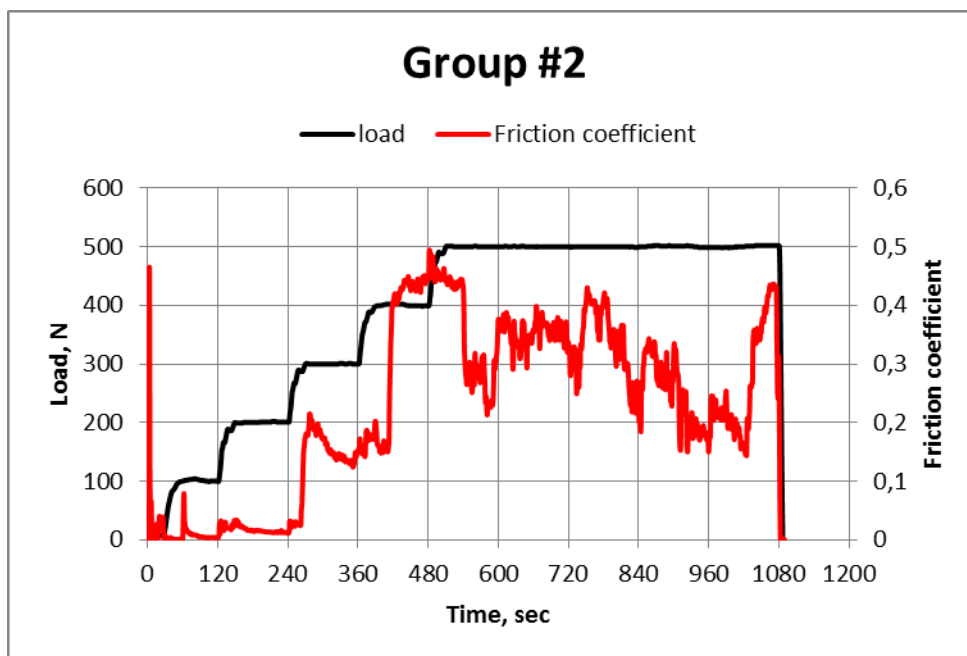


Рис.21. Диаграмма зависимости коэффициента трения от усилия прижатия

По результатам проведенного комплекса испытаний были сформулированы следующие рекомендации к защитным противоизносным покрытиям на алюминиевые бурильные трубы:

- Свойства покрытия должны соответствовать уровню высокопрочных конструкционных материалов;

- Прочностные характеристики материала покрытия (предел прочности, текучести при испытаниях на статическое растяжение) должны быть выше «с запасом» максимально допустимых при эксплуатации напряжений на поверхности бурильной трубы (или «лучше сказать» на уровне прочностных свойств материала бурильной трубы);

- Величина относительного удлинения (при испытаниях на статическое растяжение) материала покрытия должна быть больше, чем величина упругой деформации на поверхности трубы при максимальных режимах эксплуатации:

- при скручивании,
- при изгибе,
- при растяжении.

- Величина адгезивной связи материала покрытия с поверхностью образца должна быть удельных напряжений на поверхности трубы при максимальных режимах эксплуатации;

- Величина интегральной твердости поверхности покрытий должна быть на уровне твердости высокопрочных стальных конструкционных материалов (допустимо 400-500ед НВ).

- Допустимы способы нанесения покрытий типа ЭДП и HVOF.

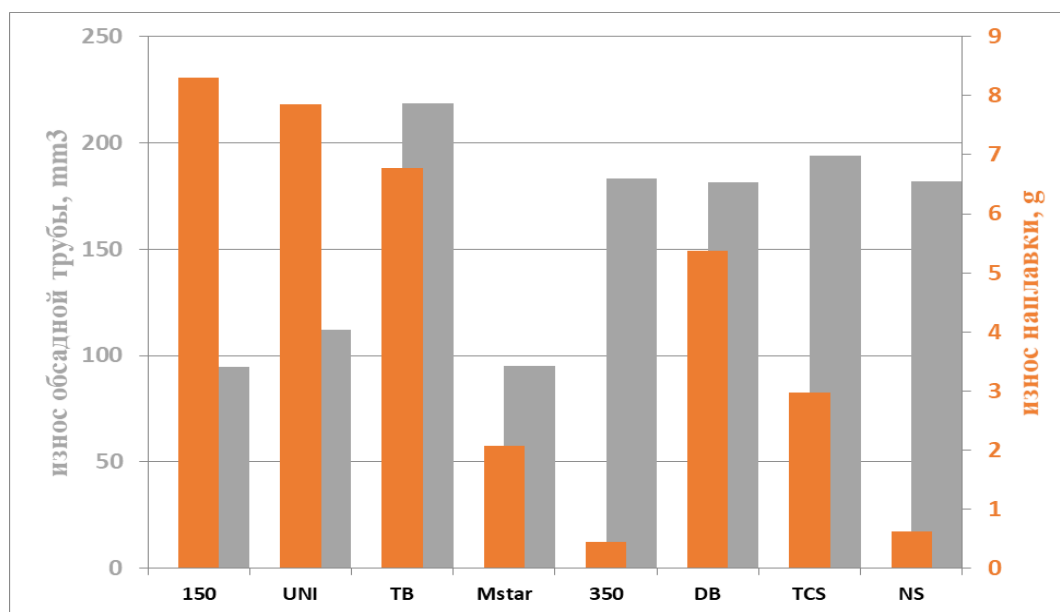
- Технологии нанесения опытных покрытий на трубные образцы должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить наименьший разогрев этих образцов.

- Технология нанесения опытных покрытий должна обеспечить их уровень пористости не более 2-4%.

- При нанесении покрытия желательно использовать промежуточное покрытие (подслой), для минимизации возникновения контактной коррозии

- Желательно обеспечение микрорельефа на подложке, для улучшения адгезионных свойств

Помимо испытаний противоизносных покрытий на алюминиевые бурильные трубы, также был проведен комплекс испытаний различных наплавов на замки бурильных труб. Проведен сравнительный анализ их триботехнических свойств и также оценка износа обсадной трубы в результате их совместного воздействия друг на друга. В работе были исследованы 8 различных наплавов от 7 различных производителей. Комплекс испытаний был аналогичен испытаниям противоизносных покрытий на алюминиевые бурильные трубы. Результаты трибологических испытаний представлен на диаграмме (рисунок 22)



Заключение

1. Спроектирован и реализован испытательный трибологический стенд, позволяющий проводить испытания в условиях к приближенным к реальным, разработана методика проведения испытаний на установке.
2. Проведены комплексные сравнительные испытания противоизносных покрытий на алюминиевые бурильные трубы, защитных наплавов на замки бурильных труб. Испытания включали в себя трибологические и металлографические исследование
3. Проведено физическое моделирование процессов при бурении с целью определения влияния на коэффициент трения перекачивания бурильной колонны по обсадной трубе

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. А.А. Альхименко, Б.А. Шемякинский, А.А. Харьков, Н.О. Шапошников
Разработка методики ускоренных испытаний трубных сталей нефтяного сортамента на коррозионное растрескивание. Заводская лаборатория. Диагностика материалов Том 86, №9 2020 с.70-76

Публикации в изданиях, рецензируемых SCOPUS

2. B.A. Shemyakinskiy, M.A. Skotnikova, Zixi Wang, A.A. Alkhimenko, V.P. Lozhechko. Comparative Tribological Testing of Diamond-Containing Inserts of Bearings of Main Shaft of Rotary Steerable Systems. *Key Engineering Materials: 2019-03-13. ISSN: 1662-9795, Vol. 822, pp 669-676 Revised: 2019-03-20. 2019.*
3. B.A. Shemyakinskiy, M.A. Skotnikova, Zixi Wang, A.A. Alkhimenko. Studies of Tribological and Corrosion Properties of Coatings Based on Iron for Light Alloy Drill Pipes of Aluminium Alloys. *Key Engineering Materials: 2019-03-13. ISSN: 1662-9795, Vol. 822, pp 709-715 Revised: 2019-03-20. 2019.*
4. B.A. Shemyakinskiy, A.A. Alkhimenko., S.M. Tikhonov., A.V. Mitrofanov., E.P. Sidorova. Method of testing rolled tubular products for oilfield pipes for corrosion-abrasive wear. *Key Engineering Materials: 2019-03-13. ISSN: 1662-9795, Vol. 822, pp 690-694 Revised: 2019-03-20. 2019.*
5. Alexey Alkhimenko, Nikita Shaposhnikov, Boris Shemyakinsky and Anton Tsvetkov «Several erosion tests result of means of sand control» E3S Web of Conferences 121, 03005 (2019)
6. V. Tikhonov, M. Giers, V. Yakhimovich, B. Shemyakinsky & L. Rin. Multi-component friction testing of full-scale drill pipe specimen. *WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol 76, © 2012pp 65-76. WIT Press www.witpress.com, ISSN 1743-3533 (on-line) doi:10.2495/TD120061*

Публикации в других изданиях

7. Митрофанов А.В., Альхименко А.А., Колесов С.С., Шемякинский Б.А., и др. Способ проведения испытаний проката для нефтепромысловых труб на коррозионно-абразивный износ. Патент на изобретение № 2697030 от 08.08.2019.

8. Комплексная оценка качества стальных бурильных труб: **монография** / под ред. А.Д. Бреки Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 138 с. ISBN 978-5-7679-4391-3
9. Оценка качества бурильных труб с использованием комплексной методики материаловедческих, механических, коррозионных и триботехнических исследований **монография** / под ред. А.Д. Бреки Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 134 с. ISBN 978-5-7679-4393-7

Аспирант _____ **Шемякинский**

(подпись)